

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : **2001-015055**

(43)Date of publication of application : **19.01.2001**

(51)Int.Cl.

H01J 37/153
H01J 37/05
H01J 37/147
H01J 37/28

(21)Application number : **2000-115480**

(71)Applicant : **APPLIED MATERIALS INC**

(22)Date of filing : **17.04.2000**

(72)Inventor : **ADAMEC PAVEL**

(30)Priority

Priority number : 99 292710

Priority date : **15.04.1999**

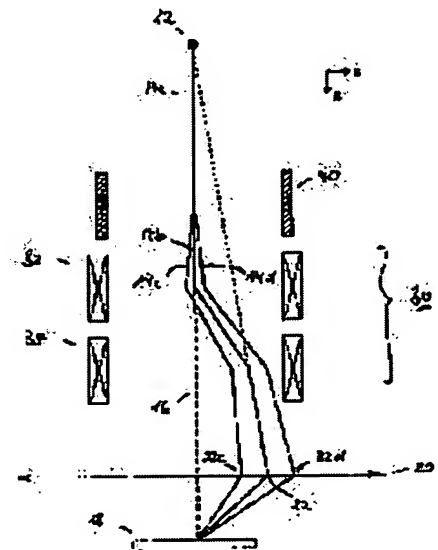
Priority country : US

(54) CHARGED PARTICLE BEAM COLUMN

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an improved charged particle beam column capable of inspecting at an inclined beam reach angle with high resolution of a charged particle image being maintained.

SOLUTION: This column for directing a charged particle beam having a limited energy expansion on a sample surface at an inclined beam reach angle is provided with a particle supply source 12, an objective lens, a deflection unit 30 for deflecting the charged particle beam apart from an optical axis so as to generate a chromatic aberration by traversing the charged particle beam across the objective lens as deviated from the axis and a correction unit for substantially correcting color dispersion on the plane of the sample surface by dispersing the charged particle beam. The effect of combination of the objective lens and the deflection unit 30 directs the charged particle beam so as to impinge on the sample surface at a large beam reaching angle.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2001-15055

(P2001-15055A)

(43) 公開日 平成13年1月19日 (2001.1.19)

(51) Int.Cl.

H 0 1 J 37/153
37/05
37/147
37/28

識別記号

F I

H 0 1 J 37/153
37/05
37/147
37/28

テーマコード(参考)

B

B

B

審査請求 未請求 請求項の数15 O L 外国語出願 (全 36 頁)

(21) 出願番号

特願2000-115480(P2000-115480)

(22) 出願日

平成12年4月17日 (2000.4.17)

(31) 優先権主張番号

09/292710

(32) 優先日

平成11年4月15日 (1999.4.15)

(33) 優先権主張国

米国 (US)

(71) 出願人 390040660

アプライド マテリアルズ インコーポレ
イテッド

APPLIED MATERIALS, I
NCORPORATED

アメリカ合衆国 カリフォルニア州

95054 サンタ クララ パウアーズ ア
ベニュー 3050

(72) 発明者 バウエル アダメック

ドイツ国, ハール 85540, ヤクトフ
エルトリンク 73

(74) 代理人 100088155

弁理士 長谷川 芳樹 (外2名)

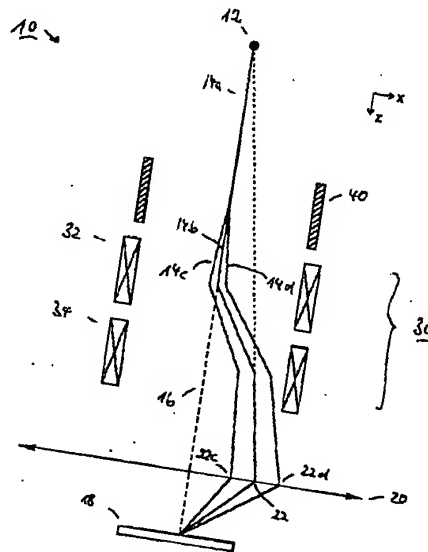
(54) 【発明の名称】

荷電粒子ビームカラム

(57) 【要約】

【課題】 荷電粒子像の高分解能を維持しながら傾斜ビー
ム到達角度で検査可能である改良形の荷電粒子ビームカ
ラムを提供する。

【解決手段】 傾斜ビーム到達角度で試料表面に有限の
エネルギーの広がりをもつ荷電粒子ビームを向けるため
のカラムは、粒子供給源と、対物レンズと、荷電粒子ビー
ムが軸外れの状態に対物レンズを横断することによ
り、色収差を生じるように光軸から離れて荷電粒子ビー
ムを偏向させるための偏向ユニットと、荷電粒子ビー
ムを分散することにより、試料表面の平面で色分散を実質
的に補正する補正ユニットとを備え、対物レンズと偏向
ユニットを組み合わせた作用により、大きなビーム到達
角度で試料表面に当たるように荷電粒子ビームが向けら
れる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを供給するための粒子供給源と、

荷電粒子ビームを試料表面に集束させるための対物レンズと、

荷電粒子ビームが軸から外れた状態で対物レンズを横断することによって、色収差が生じるように光軸から離れて荷電粒子ビームを偏向するための偏向ユニットと、荷電粒子ビームを分散することにより、試料表面の平面で前記色収差を実質的に補正するための補正ユニットであって、

対物レンズと偏向ユニットとを組み合わせた作用により前記大きなビーム到達角度で試料表面に当たるように電荷粒子ビームを向ける補正ユニットとを備える、傾斜ビーム到達角度で有限エネルギーの広がりを持つ荷電粒子ビームを試料表面に向けるためのコラム。

【請求項2】 前記偏向ユニットは、 25° より小さく、好ましくは $3^\circ \sim 15^\circ$ 、更に好ましくは $5^\circ \sim 10^\circ$ のビーム到達角度を提供するように適合されている請求項1記載のコラム。

【請求項3】 前記偏向ユニットが、粒子供給源の見掛けの位置が若しくは粒子供給源の中間像と一致する点から現れるように見える経路に、光軸から離れて荷電粒子ビームを偏向させる二つの偏向器とを備える請求項1記載のコラム。

【請求項4】 前記補正ユニットが、交差した静電偏向フィールドと磁気偏向フィールドを発生させるための手段であって、好ましくは光軸に垂直な静電磁界を発生するための手段を備える請求項1記載のコラム。

【請求項5】 前記補正ユニットは、静電磁気多極子（ $2n$ 極、 $n=1, 2, 3, \dots$ ）であり、好ましくは静電磁気二極子（2極）、四極子（4極）、六極子（6極）及び八極子（8極）からなる群から選択される請求項1記載のコラム。

【請求項6】 前記静電磁気 $2n$ 極が、 $2n$ 個の極片と $2n$ 個の別々の電極からなり、極片と電極は光軸に対して垂直な平面に配置されている請求項5記載のコラム。

【請求項7】 前記静電磁気 $2n$ 極は $2n$ 個の極片からなり、 $2n$ 個の極片のそれぞれは電極として用いられ、前記極片は光軸に対して垂直な平面に配置される請求項5記載のコラム。

【請求項8】 前記補正ユニットは粒子供給源と偏向ユニット間に配置される請求項1記載のコラム。

【請求項9】 前記補正ユニットは偏向ユニット内に配置される請求項1記載のコラム。

【請求項10】 前記対物レンズは磁気界浸レンズである請求項1記載のコラム。

【請求項11】 前記対物レンズは複合磁気静電レンズであり、好ましくは複合磁気静電レンズの静電部分は静電減速レンズである請求項1記載のコラム。

【請求項12】 試料と対物レンズの極片との間に電位差を印加するための手段を更に備えた請求項1記載のコラム。

【請求項13】 試料表面上で荷電粒子ビームを走査するための手段を更に備えた請求項1記載のコラム。

【請求項14】 (a) 光軸に沿って伝播し、有限のエネルギーの広がりを持つ荷電粒子ビームを供給するステップと、

(b) 対物レンズで試料表面に荷電粒子ビームを集束させるステップとを備える、傾斜ビーム到達角度で有限のエネルギーの広がりを持つ荷電粒子ビームを試料表面に向けるための方法であって、前記方法は更に、

(c) ビーム到達角度を選択するステップと、

(d) 荷電粒子ビームが軸外れ状態で対物レンズを横断することにより、第1の色収差を生じるように、光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを光軸から離れて偏向させるステップであって、

ビームを偏向させ集束させる作用を組み合わせることによって荷電粒子ビームを向けて、大きなビーム到達角度で試料表面に当たるように偏向の大きさが選択される偏向ステップと、

(e) 荷電粒子ビームを分散させることによって、前記第1の色収差と実質的に同じ種類及び大きさであるが実質的に反対方向である第2の色収差を生じて、試料表面の平面で前期第1の色収差を実質的に補正する分散ステップとを備える方法。

【請求項15】 前記ステップ(e)は、光軸に対して実質的に垂直で、且つ互いに実質的に垂直な交差した静電界と磁界を光軸に沿った領域内に発生させ、更に前記領域を介して荷電粒子ビームを通過させる請求項14記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】（技術分野）本発明は、試料を検査するための荷電粒子ビームコラムに関する。更に詳しく言えば、本発明は、傾斜角の到達角度で試料表面上にビームが到達するビームコラムに関するものである。

【0002】（背景技術）走査形電子顕微鏡（SEM）等の荷電粒子ビーム装置では、荷電粒子ビームの典型的な開口角度及び典型的な到達角度は数ミリラジアン程度のものである。多くの応用では、荷電粒子ビームは、 $90 \sim 180$ ミリラジアンに対応する約 $5^\circ \sim 10^\circ$ とかなり大きな角度で試料表面上に到達する。更に、 15° を超える角度や更に 20° を超える角度の傾斜を必要とする使用もある。

【0003】大きな到達角度を必要とするある応用は、試料表面を立体的に視覚化する場合である。SEMを用いた立体写真技術は、走査形電子顕微鏡の開発初期の時代まで遡る。実質的に比較的粗い試料の全ての部分から電子が収集されるので、SEMの像はかなり「実際の」外観を有するものとなる。このような実際の外観を得ら

れる主な理由は、ビーム衝突点で発生した二次電子信号が、分散照射された巨視的対象物の表面の知覚的輝度と同じように表面の局所的な傾斜で変化するためである。更に、この信号が検出器からの弱い電界により収集される効率性が変化することにより、位置関数として信号が修正され、あたかも試料表面が影を含むように見える。このように像は従来の白黒写真の視覚的手掛かりを持っているが、これらの手掛かりは多くの場合当てにならないものである。従って、確実な透視情報を提供する方法を得ることが必須となる。立体的な視覚化は、そのような方法である。他のコード化メカニズムでは不明瞭な結果を生じる状態のものを検出し解析することは、有益であり、かつ時には不可欠なものである。

【0004】別の応用では、試料表面に関する地形的な情報が、例えば傾斜ビームで得た対の立体像の視差から抽出される。更なる応用である試料の三次元結像でも、例えば米国特許第5,734,164号公報に開示されているように、数度だけビームを傾斜させることを必要とする。

【0005】これら全ての応用では、ビームを傾斜させるメカニズムが重要な役割を果たす。初期の解決策としては、試料を機械的に傾けて二つの透視像を得て、立体効果を達成していた。しかしながら、機械的な不完全性により、試料が横方向に移動することは避けられず、対の立体像の要素間に位置合わせ誤差を生じてしまうことがよくある。これは、集積回路のメモリセルアレイ等のように非常に規則的な構造物に関しては特に問題となるものである。

【0006】ビームの傾斜を電氣的に実行する場合、横軸の位置合わせに関する限り、試料が水平方向に維持されているということが非常に重要な利点となる。更に、電氣的に傾斜させる作業は機械的に傾斜させるよりもかなり高速に処理できる。しかしながら、電氣的方法にも欠点がある。ある方法において、ビームは、各光線が電子源(図2を参照)の見掛けの位置と一致する点から現れるように、対物レンズの上方で偏向される

(前方レンズ偏向)。このようにして、試料表面が集束状態にある限り、各光線は試料の同じ領域に集束される。しかしながら、その結果として、ビームはレンズ収差により付随して生じた劣化でかなり軸から外れて対物レンズのフィールドを横切ることになる。特に、色収差で得られる分解能は数10ナノメートルまでに制限される。多くの応用では、約5nmよりも高い分解能が要求される。

【0007】別の方法として、偏向コイルが対物レンズの下方に配置されれば(後方レンズ偏向)、ビームは光軸上でレンズを通過する(図3)。しかしながら、最終レンズの下方にある偏向コイルの物理的寸法により、獲得可能な最小作業距離、即ち最終レンズと被検査試料との間の獲得可能な最小距離が制限される。従って、作業

距離が広くなり器具の分解能が劣化することにより、許容可能な程度の分解能を得ることができない。

【0008】(発明の開示)本発明は、上述した従来例の欠点や不利益を解消することを目的とする。特に、本発明は、試料が、荷電粒子像の高分解能を維持しながら傾斜ビーム到達角度で検査可能である改良形の荷電粒子ビームカラムを提供することを目的としている。この目的を達成するために、本発明の一つの態様によれば、独立の請求項1に記載されたカラム及び請求項13に記載された方法が提供される。

【0009】本発明の更なる好適な特徴、態様及び詳細は、従属の請求項、明細書の記載及び添付の図面から明らかになる。本発明の請求項は、本発明を一般的な用語で規定するための第1の非制限的アプローチとして理解されることを意図したものである。

【0010】一つの態様によれば、本発明は、傾斜ビーム到達角度で有限のエネルギーの広がりをもつ荷電粒子ビームを試料表面に向けるためのカラムを提供し、このカラムは、光軸に沿って伝播する荷電粒子ビームを供給するための粒子供給源と、荷電粒子ビームを試料表面に集束させるための対物レンズと、荷電粒子ビームが軸外れ状態で対物レンズを横切るように光軸から離れて荷電粒子ビームを偏向させることにより色収差が生じる偏向ユニットと、荷電粒子ビームを分散することによって、試料表面の平面で色収差を実質的に補正する補正ユニットとを備え、対物レンズと偏向ユニットとを組み合わせる作用によって、荷電粒子ビームが傾斜ビーム到達角度で試料表面に当たるように向けられる。

【0011】前述したように、偏向は、対物レンズを通るビーム経路が軸から外れると、ビームの有限のエネルギーの広がりによる大きな色収差の原因となる。驚くべきことに、本発明の発明者らにより、偏向で生じたこの第1の色収差は、第1の色収差と実質的に同じ種類と大きさの第2の色収差を導入するが、実質的に反対方向のものである要素を追加することによって、試料表面の平面で補正されることが分かった。このような第2の色収差は、荷電粒子ビームを分散することによって導入される。

【0012】好適な実施形態では、補正要素は、交差した静電偏向フィールドと磁気偏向フィールドを発生させるための手段を備える。交差した静電磁界は、光軸に実質的に垂直に作られ、いわゆるウィーンフィルタを形成するものが好ましい。補正ユニットは、静電磁気多極子(2n極、n=1, 2, 3, ...)形が有利であり、好ましくは静電磁気二極子(2極)、四極子(4極)、六極子(6極)及び八極子(8極)からなる群から選択される。

【0013】更なる好適な実施形態では、静電磁気2n極は、極片と離れた位置にある2n個の極片と2n個の電極からなる。極片と電極は光軸に対して垂直な平面に

配置されている。更なる好適な実施形態では、静電磁気2n極は2n個の極片からなり、2n個の極片のそれぞれは電極として同時に用いられる。極片は光軸に垂直な平面に配置される。

【0014】特定の理論に限定せずに考えると、カラムでのウィーンフィルタの補正効果は今のところ以下のように理解されている。

【0015】ある一定のビーム到達角度、例えば 5° では、必要な偏向によってビームの中心が光軸からある距離離れた位置にある対物レンズを通過する。対物レンズの集束距離は荷電粒子エネルギーと、ビームの中心の軌道と光軸との間の距離に依存するものである。荷電粒子ビームが有限のエネルギーの広がりを持つため、異なるエネルギーを持つ粒子は、僅かに異なる方向にレンズによって偏向され、レンズの色収差を引き起こす(図3を参照)。

【0016】ウィーンフィルタでは、電界Eと磁界Bは、荷電粒子、 $F_{el} = qE$ 、 $F_{mag} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ に電力及び磁力を発生し、ここで $q = -e$ は電子の電荷である。電界と磁界が互いに垂直であり、更に荷電粒子の速度に対して垂直であれば、電力及び磁力の方向は反対である。ある速度 $\mathbf{v} = |\mathbf{E}|/|\mathbf{B}|$ を有する粒子では、正味の力は零であり、それらは非動作のフィルタを通過する。異なる速度を有する粒子は、正味の力 $\mathbf{F} = |\mathbf{F}_{el} - \mathbf{F}_{mag}|$ を受け、ウィーンフィルタで偏向される。実際、ウィーンフィルタを通過し有限のエネルギーの広がりを有する荷電粒子ビームは、異なるエネルギーを有する粒子が異なる量だけ偏向されるように、分散される。

【0017】分散することにより、対物レンズの色収差を少なくとも部分的に補正する。従って、本発明は、サンプル表面上での大きなビーム到達角度が、色収差が大きいことから生じる分解能を通常のように低減せずに得られるという利点を有する。

【0018】補正ユニットが、nが少なくとも2である静電磁気2n極により形成される場合では、磁界及び静電界は共に調整されて、光軸に垂直な平面で任意の方向に偏向することが可能である。それによって、偏向作用のあらゆる方向に補正がなされる。

【0019】補正ユニットが、nが少なくとも3である静電磁気2n極により形成される場合では、より同質の偏向フィールドが発生する。これは、フィールドがより強い場合や、ウィーンフィルタのビーム直径が大きい場合や、若しくは電荷ビームがフィルタを軸外れ状態で通過する場合、特に重要なものである。更に、より高次の偏向フィールドが発生して、2番目に大きな傾斜収差を形成する対物レンズのコマを減少又は補正することが可能である。

【0020】極片が同時に電極として使用されれば、実質的に同一の空間的分布を有する電磁気フィールドが発生する。偏向フィールドが非常に強いものである場合、

フィールドの合致度が優れていることが重要である。

【0021】好適な実施形態では、偏向ユニットのビーム到達角度は、 25° よりも小さく、好ましくは $3^\circ \sim 15^\circ$ 、更に好ましくは $5^\circ \sim 10^\circ$ のものである。

【0022】更なる好適な実施形態では、偏向ユニットは、粒子供給源の見掛けの位置と一致する点から現れるように見える経路か、若しくは適用できるならば粒子供給源の中間像の見掛けの位置と一致する点から現れるように見える経路に、光軸から離れて荷電粒子ビームを偏向する二つの偏向器を備える。

【0023】更なる好適な実施形態では、補正ユニットは、粒子供給源と偏向ユニットの間に配置される。偏向ユニット内に補正ユニットを配置することが利点になる場合もある。これらの二つの配置は好適なものであるが、偏向ユニットの下方に補正ユニットを配置することも可能である。

【0024】本発明の好適な態様において、これまで記載した偏向システムは種々の対物レンズで使用可能であるが、対物レンズは複合磁気静電レンズである。好ましくは、複合磁気静電レンズの静電部分は、静電減速レンズである。このような複合磁気静電レンズを用いることによって、SEMの場合数100電子ボルト等のような、低加速エネルギーで優れた分解能が得られる。このような低加速エネルギーは特に現在の半導体産業においては望ましいものであり、放射感度性の試料を帯電させたり損傷を与えないように、又はそのどちらかを与えないようにする。好適な実施形態では、静電減速レンズは荷電粒子として電子ビームエネルギーを、5keVより低く、好ましくは2keVより低く、更に好ましくは約1keV以下まで下げる。

【0025】本発明の特に好適な態様によれば、対物レンズは磁気界浸レンズである。

【0026】好適な実施形態では、カラムは、試料と対物レンズの極片間に電位差を印加するための手段を備える。従って、静電減速レンズは、試料と対物レンズの極片間に設けられ、更なる電極が必要なくなる。しかしながら、このように発生した減速フィールドを補充及び/又は修正するために更なる電極を使用する場合もあることは当業者により認識されるであろう。

【0027】好ましくは、カラムは試料表面上に荷電粒子ビームを走査するための手段を更に備える。

【0028】本発明は、(a)光軸に沿って伝播する有限のエネルギーの広がりを有する荷電粒子ビームを供給するステップと、(b)対物レンズで試料表面に荷電粒子ビームを集束させるステップとを備える、傾斜ビーム到達角度で有限のエネルギーの広がりを有する荷電粒子ビームを試料表面に向けるための方法であって、前記方法は更に、(c)ビーム到達角度を選択するステップと、

(d)荷電粒子ビームが軸外れ状態で対物レンズを横断して、第1の色収差を生じるように、光軸に沿って伝播

する荷電粒子ビームを光軸から離れて偏向させるステップであって、ビームを偏向させ集束させる作用を組み合わせることによって荷電粒子ビームが方向付けられて、大きなビーム到達角度で試料表面に当たるように偏向の大きさが選択される偏向ステップと、(e) 荷電粒子ビームを分散することによって、第1の色収差と実質的に同種であり、同じ大きさであるが、実質的に反対方向の第2の色収差を導入して、試料表面の平面で第1の色収差を実質的に補正する分散ステップとを備えることを特徴する。

【0029】好ましくは、本発明のステップ(e)は、光軸に沿った領域内に光軸と実質的に垂直で且つ互いに実質的に垂直な交差した静電界と磁界を発生させるステップと、この領域を介して荷電粒子ビームを通過させるステップとを備える。

【0030】本発明の上述した態様や他のより詳細な態様のいくつかは、以下の記載に記述されており、図を参照し部分的に説明されるであろう。

【0031】図面において、同じ参照番号は同じ要素を指している。

【0032】

【好ましい実施形態の説明】以下には、本発明の好適な実施形態は電子を荷電粒子として用いるものとして記載されている。しかしながら、本発明は、電子の使用に限られたものではなく、陽子、イオンや他の荷電粒子も同様に使用することも含んでいる。

【0033】本発明をより良く理解するために、SEMの従来の設計に関する典型的な問題を、図3及び図4に示す。本発明を理解するにはあまり重要ではない電子供給源のアノード、コンデンサレンズ、開口部、走査コイル、検出器等の要素は、図面では省略している。一般的に、電子ビームは電子源12から放出され、光軸16に沿って対物レンズ20の方向に伝播する。

【0034】ビームの電子は単色ではなく、僅かに異なるエネルギーで放出される。例えば、熱電子銃において、エネルギーの広がり（即ち、電子エネルギー分布の最大の半分における全幅）は、ほぼ $\Delta E = 2.5 k T_c$ であり、ここで T_c はカソードの先端の温度であり、 k はボルツマン定数である。このようなエネルギーの広がり、クロスオーバーの近くにある空間電荷振動から生じるベルシュ(Boersch)効果により更に増加するため、熱電子タングステンカソードのエネルギーの広がり $\Delta E = 1 - 3 \text{ eV}$ であり、 $L a B_6$ カソードの値は $\Delta E = 0.5 - 2 \text{ eV}$ である。電界放出銃は通常、カソード温度がほぼ $\Delta E = 0.2 - 0.4 \text{ eV}$ とより小さいため、より低いエネルギーの広がりを有する（エル・レイマー(L. Reimer)、走査形電子顕微鏡、スプリングァー(Springer)、1985年）。

【0035】対物レンズ20は、電子ビームを試料18の表面に集束させる。電子ビームと試料18とを相互作用

用させて、適切な検出器（図示せず）で収集され検出される二次電子を発生させる。

【0036】図3では、二段前方レンズ偏向ユニット70が光軸16に沿って経路15aから経路15bに偏向し、これは粒子供給源12の見掛けの位置と一致する点から現れるように見える。このように、偏向されたビームは、試料表面が集束状態（光線15d）にある限り、対物レンズ20によりあらゆる偏向に対して試料の同じ領域に集束される。偏向により、ビームはかなり軸から外れて対物レンズのフィールドを横切る（参照番号22）ため、ビームの有限のエネルギーの広がりから生じる色収差が大きくなる。

【0037】軸上ビームでは、有限エネルギーのビームの広がり、直径 d_c を有するあまり混乱がない円形のものとなり、この直径は

$$d_c = C_c \alpha \Delta E / E \quad (1)$$

で表わされる。ここで、 C_c は色収差係数で、 α は通常収束角であり、 $\Delta E / E$ は電子ビームエネルギーの分数変分である。収束角 α の軸上ビームの色収差を示す式

(1)はまた、電荷粒子ビームが軸から外れてレンズを通過する場所の状況を示すように用いることも可能である。この場合、等式(1)において収束角 α はビーム到達角度と置き換えなければならない、長さ d_c は細長いビームの断面の横方向の広がりである。通常収束角（数10分の1度）と比較してビーム到達角度が非常に大きい（数度）と、色収差が大きくなる。

【0038】この効果は、 $E - \Delta E$ 、 E 、 $E + \Delta E$ のエネルギーをそれぞれが有する電子を表わす光線15e、15d、15cによって図3に略図的に示されている。図示されているように、より高いエネルギーを有する電子は、低いエネルギーを有する電子よりも少なく偏向されている。図3に示されているように、色収差は像をぼやかし、獲得分解能を数10ナノメートルのものに制限する。

【0039】図4は、偏向コイル82、84が対物レンズ20の下側に配置されて後方レンズ偏向システム80を形成する代替的な従来の設計を示すものである。ビームが対物レンズ20を通過した後、第1の偏向コイル82は光軸から離すようにビームを偏向させ、第2の偏向コイル84はビームを光軸に戻すように方向付けて、所望のビーム到達角度で試料に当たるようにする。ビームが光軸16上で対物レンズ20を通過するので、分解能はレンズの軸外れ収差によって劣化することはない。しかしながら、最終的なレンズ20の下側にあるコイルの物理的寸法により、対物レンズにより、より長い焦点距離が必要となるため、獲得できる最小作業距離が制限されてしまう。焦点距離がより長いと色収差や更に球面収差まで高くなってしまふ。従って、図4に示された解決法では、満足のいく像分解能は得られない。

【0040】図1は、参照番号10で一般的に示した、

本発明によるカラムのある特定の実施形態を示す図である。上述したように、電子ビームは電子供給源12から放出され、経路14a上を光軸16に沿って試料18の表面にビームを集束させる対物レンズ20の方へと伝播する。偏向ユニット30は、電子供給源12の見掛けの位置と一致する点から現れるように見えるビームを光軸から経路14bへと偏向するための二つの偏向器コイル32、34を備える。カラムの設計にもよるが、参照番号12は、電子供給源そのものか、若しくは電子供給源の中間像を表すものとされる。

【0041】図1の実施形態では、偏向ユニット30は、電子供給源12（若しくは電子供給源の中間像）と対物レンズ20との間に配置され、即ち、偏向ユニット30は前方レンズ偏向ユニットとして示されている。しかしながら、偏向ユニット30は、それぞれのフィールドが重複するように対物レンズ20の内側深くあるいは近傍に配置されることもある。

【0042】偏向ユニット30の上方に、電界と磁界を交差させて発生するウィーンフィルタ40が配置されている。電子が一般的に+z方向に移動し、偏向ユニット30は電子を+x方向に偏向させる図1の実施形態では、電界Eはx軸に沿って選択され、磁界Bはy軸に沿って選択される。上述したように、電子にかかる電力と磁力は反対方向のものである。速度 $v = |E| / |B|$ を有する電子が動作していないフィルタを通過し、一方で異なる速度を有する電子はある正味の力を受けて、ウィーンフィルタ40により偏向される。

【0043】偏向角が小さい場合、運動量近似が用いられ、次いで偏向のピボット点は偏向ユニットの中心にある。電子が長さLの横方向のフィールドを有する領域を介して電子が飛行すると仮定すると、偏向フィールドを介した飛行時間中、電子への運動量輸送 p_x は、 $p_x = eL(E_x/v + By)$

である。ここで、 $-e$ は電子の電荷であり、 E_x は+x軸に沿った電界であり、 By は+y軸に沿った磁界であり、 v は+z軸に沿った電子速度である（エル・レイマー、上記に引用）。上記等式から容易に分かるように、速度 $v_0 = E_x / -By$ を有する電子では、運動量輸送は零であり、即ちこれらの電子は動作していないフィルタを通過する。 v_0 を意味のあるもの（即ち、正）にするためには、 E_x と By は反対の符号のものでなければならず、例えば、電界が正のx方向に沿って印加され、磁界が負のy方向に沿って印加される。

【0044】 v_0 よりも僅かに速いか若しくは遅い速度を有する電子では、運動量輸送は偏向角 $\epsilon = p_x / p_z$ となる。この偏向角は、電子の速度が v_0 よりも遅ければ、正（x方向に偏向、経路14d）であり、電子が v_0 よりも速ければ負（-x方向に偏向、経路14c）である。

【0045】対物レンズ20を通る電子ビーム経路が軸

から外れていることにより、第1の色収差が生じる。ウィーンフィルタ40のエネルギー分散効果は、第1の色収差と同種の第2の色収差を生じさせる。電界Eと磁界Bの強度を適切に選択することによって、第2の色収差は、第1の色収差と同じ大きさをもつが反対方向のものになるように調整できる。実際、第2の色収差は試料表面の平面で第1の色収差を実質的に補正する。

【0046】等式（1）によれば、対物レンズ20の色収差はビーム到達角度に依存している。異なるビーム到達角度では、電子ビームは光軸16から一般的に異なる位置にある対物レンズ20を横断する。従って、動作中ビームの到達角度の変更が望ましければ、ウィーンフィルタ40の電界及び磁界はそれに応じて設定されなければならない。

【0047】図2は、本発明の別の実施形態を示すもので、ウィーンフィルタ40は偏向ユニット30の上方に配置されておらず、偏向ユニット30のフィールドとウィーンフィルタ40のフィールドが重複するように偏向ユニット内に配置されているものである。図2は、第2の偏向コイル34の高さに配置されたウィーンフィルタ40を図示しているが、これは単に図解を容易にするためである。第1の実施形態にあるように、ウィーンフィルタは電子ビーム114aを分散させ、より高速の電子（エネルギー $E + \Delta E$ ）が光軸16により近い位置で対物レンズ20を横断し（経路114c）、一方でより低速の電子（エネルギー $E - \Delta E$ ）が光軸から更に離れた位置で対物レンズ20を横断する。対物レンズ20の偏向が低速電子に対してより強いので、粒子は全て試料18上の同じスポットに集束される。

【0048】図は、二つの偏向コイル32、34からなるように偏向ユニット30を図示しているが、単一の偏向器のみからなる偏向ユニット30を用いることも本発明の範囲内である。例えば、参照番号12は電子源の中間像を表わす場合、中間像の高さに配置された単一の偏向器は、電子源の中間像から現れるように見える経路に光軸16からのビームを十分に偏向する。

【0049】図5（a）及び図5（b）はウィーンフィルタの実施形態を示しており、ウィーンフィルタは静電磁気四極子（4極）140を形成する。四極子は、四極片142と四電極144とからなる。電極と極片は、光軸16に垂直な平面に配置される。図5（a）に最も良く示されているように、電極と極片は、 $\pi/2$ の角度だけ間隔をとって離して、円の周辺に沿ってそれぞれ配置される。極片とそれに対応する電極は同じ長さ（図5（b））とほとんど同じ半径（図5（a））をもつので、生じた電界と磁界の分布は非常に類似したものであり、ウィーンフィルタの光軸に沿ったあらゆる点で速度 v_0 を有する電子の電力及び磁力を良好に補正することができる。

【0050】電界と磁界は互いに厳密に一致するもので

ある必要はないが、一致しなければ、別の種類のフィールドによって偏向が補正される前に電子ビームが光軸から強く偏向されて、更なる軸外れ収差を生じてしまうため、それらは一致するほうが好ましい。

【0051】このような四極子配置を用いることによって、磁界と静電界は、光軸に垂直な平面で任意の方向に偏向するように調整可能である。それによって、偏向作用のあらゆる方向に補正をすることが可能である。ウィーンフィルタの偏向フィールドが強いことから、非点収差が生じることがある。このような非点収差は、ウィーンフィルタ上の四極子（無収差子）静電界若しくは磁界を励起させることにより補正できる。

【0052】また、極片を用いずに、即ち空気コイルのみを用いて磁界をつくることも可能である。しかしながら、静電界と磁界との一致は通常、前述した場合ほど良好なものではない。

【0053】ウィーンフィルタの別の実施形態（図6（a）、図6（b））では、静電磁気四極子240の4個の極片242は磁気回路246から電気的に絶縁されている。従って、それらは電極として同時に使用することが可能である。これは、極片と電極の形状が自動的に一致し、電界及び磁界を実質的に同一の空間分布をもつようにするという利点を有する。偏向フィールドが非常に強く、僅かなフィールドのずれでさえ大きなビーム偏向につながる場合であれば、それぞれのフィールドの合致度が優れていることは重要なことである。

【0054】図7及び図8は、ウィーンフィルタの実施形態を示すもので、ウィーンフィルタは静電磁気八極子（8極）340を形成する。図7に示されている実施形態は、 $\pi/4$ の角度だけ間隔をとって離され、円の周辺に沿って光軸16に垂直な平面に配置された8個の極片342と8個の電極344からなる。再度、極片とそれに対応する電極は、同じ長さとはほぼ同じ半径（図7）を有し、電界と磁界は類似した空間分布をもつことになる。図8の実施形態では、静電磁気八極子440の極片442は、磁気回路446から隔離されているため、電界を発生させる電極として同時に使用される。

【0055】静電磁気八極子によって、より一様な偏向フィールドを発生させることができる。この特徴は、偏向フィールドが強い場合か、ウィーンフィルタの直径が大きい場合か、若しくは荷電粒子ビームがまったく光軸上にはないウィーンフィルタを通過することが望ましい場合、特に重要である。更に、より高次の偏向フィールドが発生され、対物レンズのコマを減少若しくは補正し、大きなビーム到達角度から生じる2番目に大きな収差を形成する。従って、極めて大きなビーム到達角度（ $>15^\circ$ ）が、5nmよりも小さい優れた分解能で達成される。

【0056】本発明を説明する更なる実施形態が図9～図12に図示されている。図9は、ウィーンフィルタ4

0を図示しており、例えば、偏向ユニット30の上方に配置され、図5～図8のいずれかによる静電磁気多極子である。対物レンズは、例えば、単段の純粋な磁気レンズ120（図9）かもしくは界浸レンズ220であり、極片252、254は、試料18が最大磁界の領域にあるかもしくはその近くにあるように配置される（図10）。図11は、対物レンズが界浸レンズ320であり、その外側の極子352が真空室壁により形成されている場合を図示している。

【0057】約1keV以下とエネルギーがかなり低い状態で分解能を改良するための三つの実施形態が、図12の対物レンズ420に対して図示されている。第1の場合、電極424、426と、電位U2及びU3は不在である。試料18と対物レンズ420の極片452、454の間に電位差U1を印加することによって、静電減速電界がつけられる。

【0058】第2の場合では、電極424、426と、それに対応する電位U2とU3がまた存在し、試料と対物レンズ420の極片間に作り出された減速電界を補う。第3の場合では、電位U1を発生させるための手段が不在である。ここでは減速電界が電極424と426のみで作られ、電極424、426のうちの一つの電極がレンズ420の極片452、454によって形成される場合もあることは、当業者には認識されるであろう。

【0059】対物レンズ420の磁気部分が界浸レンズであることが好ましいが、これは必ずしもすべての場合で必要な条件ではない。あらゆる磁気レンズ、特に図9～図11に示されているようなものが、図12に関して上述したもののよう静電減速レンズと組み合わせられることもある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態によるビームカラムの略図的垂直断面図である。

【図2】本発明の別の実施形態によるビームカラムの略図的垂直断面図である。

【図3】前方レンズ偏向システムを用いた従来のビームカラムの略図的垂直断面図である。

【図4】後方レンズ偏向システムを用いた従来のビームカラムの略図的垂直断面図である。

【図5】（a）は本発明の実施形態によるウィーンフィルタの略図的水平断面図であり、（b）は（a）のウィーンフィルタの略図的垂直断面図である。

【図6】（a）は本発明の別の実施形態によるウィーンフィルタの略図的水平断面図であり、（b）は（a）のウィーンフィルタの略図的垂直断面図である。

【図7】本発明の更なる実施形態によるウィーンフィルタの水平断面図である。

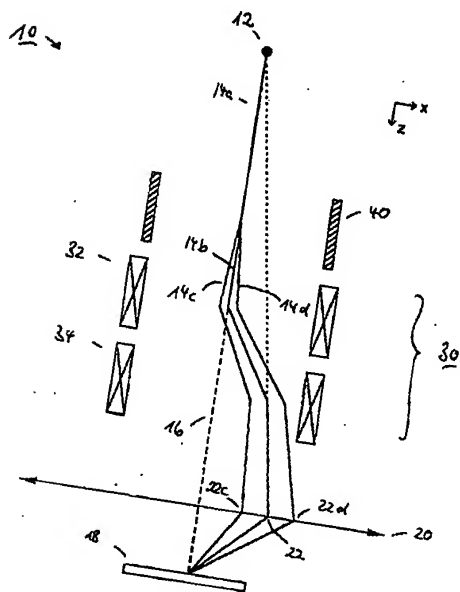
【図8】本発明の更なる実施形態によるウィーンフィルタの水平断面図である。

(8)

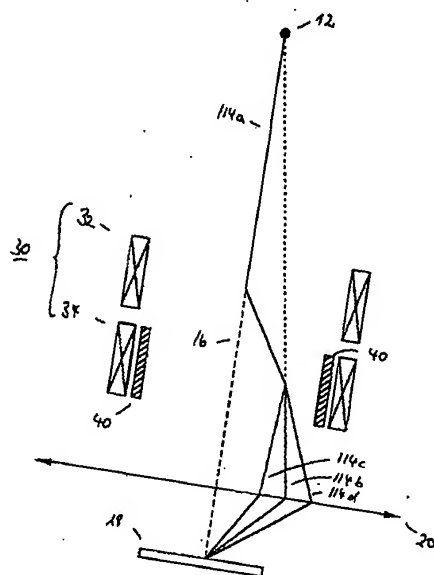
【図9】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下側部分の垂直断面図である。
 【図10】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下側部分の垂直断面図である。

【図11】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下側部分の垂直断面図である。
 【図12】本発明の更なる好適な実施形態によるビームカラムの下側部分の垂直断面図である。

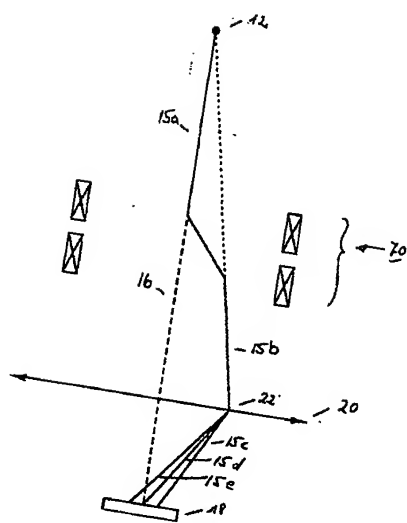
【図1】



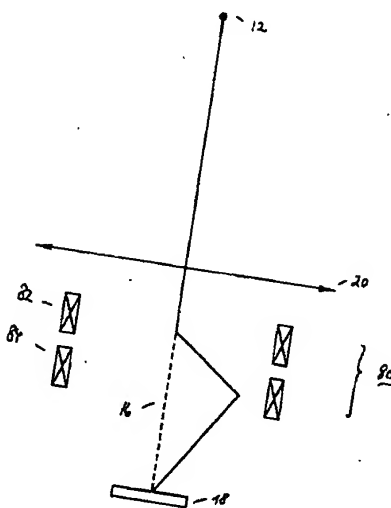
【図2】



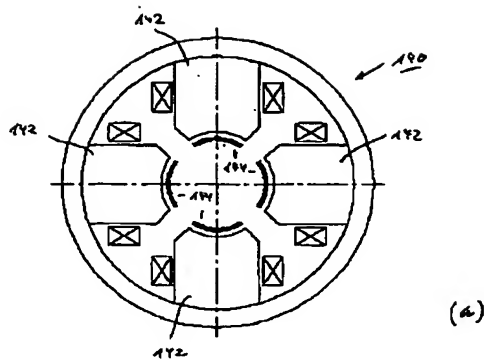
【図3】



【図4】

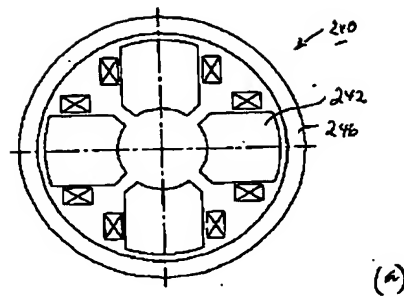


【図5】

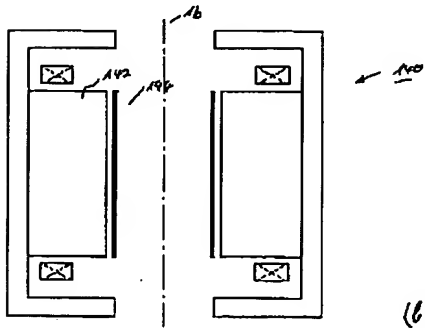


(a)

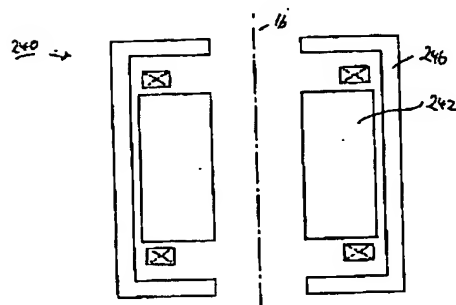
【図6】



(a)

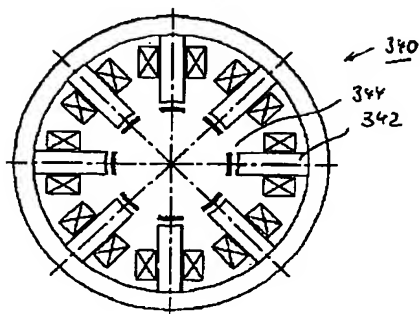


(b)

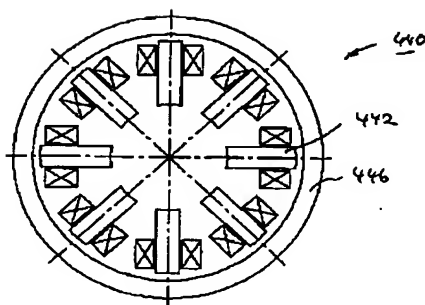


(b)

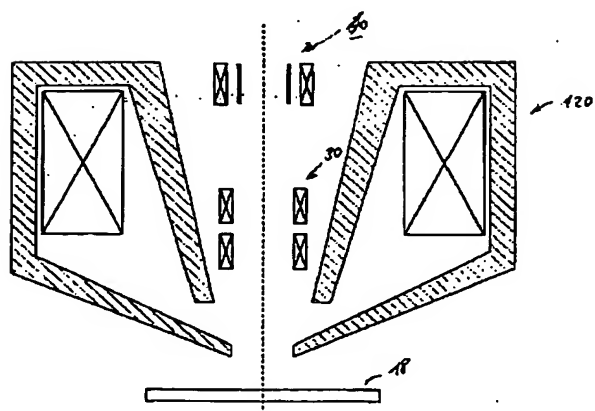
【図7】



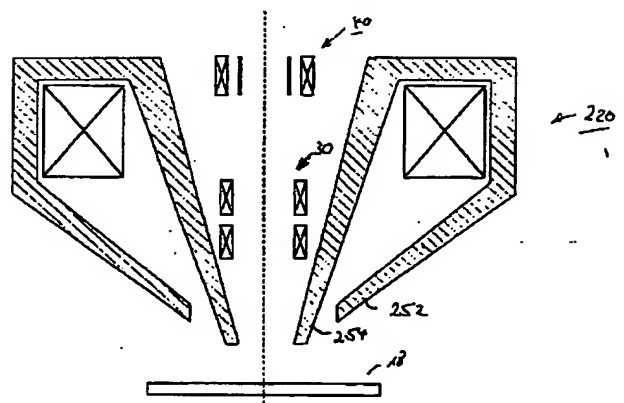
【図8】



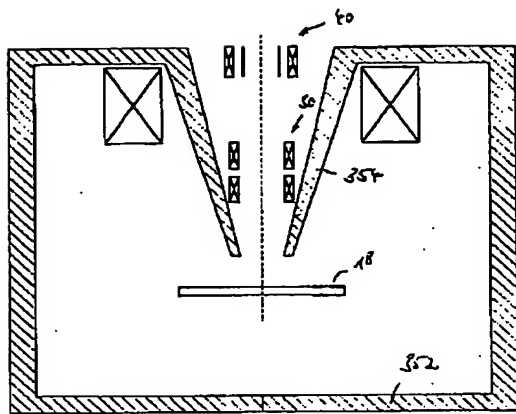
【図9】



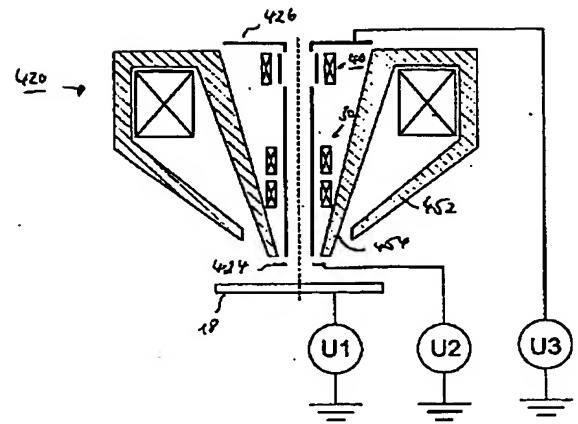
【図10】



【図11】



【図12】



【外国語明細書】

1 Title of Invention

CHARGED PARTICLE BEAM COLUMN

2 Claims

1. A column for directing a beam of charged particles with a finite energy spread onto a specimen surface under an oblique beam landing angle, the column comprising:

a particle source for providing the beam of charged particles propagating along an optical axis;

an objective lens for focussing the beam of charged particles onto the specimen surface;

a deflection unit for deflecting the beam of charged particles away from the optical axis such that the beam of charged particles traverses the objective lens off-axis, thereby causing a chromatic aberration,

a compensation unit adapted to disperse the beam of charged particles, thereby substantially compensating said chromatic aberration in the plane of the specimen surface,

whereby the combined action of the objective lens and the deflection unit directs the beam of charged particles to hit the specimen surface under said large beam landing angle.
2. The column according to claim 1, wherein the deflection unit is adapted to provide a beam landing angle less than 25° , preferably between 3° and 15° , more preferable between 5° and 10° .
3. The column according to claim 1, wherein the deflection unit comprises two deflectors adapted to deflect the beam of charged particles away from the optical axis to a path seeming to emerge from a point coincident with the apparent position of the particle source or with an intermediate image of the particle source.
4. The column according to claim 1, wherein the compensation unit comprises means for generating crossed electrostatic and magnetic deflection fields,

preferably for generating electrostatic and magnetic field perpendicular to the optical axis.

5. The column according to claim 1, wherein the compensation unit is an electrostatic and magnetic multipole ($2n$ -pole, $n=1, 2, 3, \dots$), preferably selected from the group consisting of electrostatic and magnetic dipole (2-pole), quadrupole (4-pole), hexapole (6-pole) and octupole (8-pole).
6. The column according to claim 5, wherein the electrostatic and magnetic $2n$ -pole comprises $2n$ pole pieces and $2n$ separate electrodes, wherein the pole pieces and the electrodes are arranged in a plane perpendicular to the optical axis.
7. The column according to claim 5, wherein the electrostatic and magnetic $2n$ -pole comprises $2n$ pole pieces, wherein each of the $2n$ pole pieces is adapted to be used as an electrode and wherein the pole pieces are arranged in a plane perpendicular to the optical axis.
8. The column according to claim 1, wherein the compensation unit is arranged between the particle source and the deflection unit.
9. The column according to claim 1, wherein the compensation unit is arranged within the deflection unit.
10. The column according to claim 1, wherein the objective lens is a magnetic immersion lens.
11. The column according to claim 1, wherein the objective lens is a compound magnetic-electrostatic lens, preferably where the electrostatic part of the compound magnetic-electrostatic lens is an electrostatic retarding lens.

12. The column according to claim 1, further comprising means for applying a potential difference between the specimen and a pole piece of the objective lens.
13. The column according to claim 1, further comprising means for scanning the beam of charged particles over the specimen surface .
14. A method for directing a beam of charged particles with a finite energy spread onto a specimen surface under an oblique beam landing angle, the method comprising the steps of:
 - a) providing a beam of charged particles with a finite energy spread propagating along an optical axis;
 - b) focussing the beam of charges particles onto the specimen surface with an objective lens;characterized in that the method further comprises the steps of
 - c) selecting a beam landing angle;
 - d) deflecting the beam of charged particles propagating along the optical axis away from the optical axis such that the beam of charged particles traverses the objective lens off-axis, thereby causing a first chromatic aberration, whereby the magnitude of the deflection is chosen such that the combined action of deflecting and focussing the beam directs the beam of charged particles to hit the specimen under said large beam landing angle;
 - e) dispersing the beam of charged particles, thereby introducing a second chromatic aberration of substantially the same kind and magnitude but in substantially opposite direction as said first chromatic aberration to substantially compensate said first chromatic aberration in the plane of the specimen surface.
15. The method of claim 14, wherein step e) comprises:

generating within a region along the optical axis crossed electrostatic and magnetic fields substantially perpendicular to the optical axis and to each other; and passing the beam of charged particles through said region.

FIELD OF THE INVENTION

This invention relates to a charged particle beam column for the examination of specimen. In particular, this invention relates to a beam column where the beam may land on the specimen surface under an oblique landing angle.

BACKGROUND OF THE INVENTION

In charged particle beam devices, such as a scanning electron microscope (SEM) the typical aperture angle as well as the typical landing angle of the charged particle beam is of the order of several millirads. For many applications it is desirable that the charged particle beam lands on the sample surface under a much larger angle of typically 5° to 10° , corresponding to 90 to 180 millirads. Some uses require tilt angles in excess of 15° or even 20° .

One application which requires large landing angles is the stereoscopic visualization of a specimen surface. Stereographic techniques using a SEM date back to the early developmental period of scanning electron microscopy. Since electrons can be collected from practically all parts of a relatively rough sample, a SEM image has a rather "real" appearance. The main reason for this real appearance is that the secondary electron signal produced at the point of beam impact varies with the local slope of the surface in the same way as the perceived brightness of the surface of a diffusely illuminated macroscopic object. Furthermore, variations in the efficiency with which this signal is collected by the weak electric field from the detector modifies the signal as a function of position such that it appears as if the sample surface contained shadows. While the images have thus all the visual cues of a conventional

black and white photograph, these cues are in many situations deceptive. It is therefore essential that a method which provides authentic perspective information is available. Stereoscopic visualization is such a method. It is useful and sometimes indispensable for detecting and resolving situations where other coding mechanisms yield ambiguous results.

In another application, topographical information about the specimen surface may be extracted, for example, from the parallax between stereo pairs of images obtained with a tilted beam. A further application, three-dimensional imaging of a specimen, requires also a beam tilted by several degrees, see, e.g., US Patent Number 5,734,164.

In all these applications, the beam tilting mechanism plays a key role. In early solutions, a stereo effect was achieved by mechanically tilting the specimen to provide two perspectives. However, due to mechanical imperfections, a lateral movement of the specimen is inevitable, which often results in misregistrations between the elements of a stereo image pair. This problem is especially pertinent for highly regular structures such as an array of memory cells in an integrated circuit.

When beam tilting is carried out electrically, the fact that the specimen can remain horizontally is a significant advantage as far as the lateral coordinate registration is concerned. Electrical tilting is also much faster than its mechanical counterpart. The electrical method, however, has also certain drawbacks. In one method, the beam is deflected above the objective lens (pre-lens deflection) in such a way that each ray seems to emerge from a point coincident with the apparent position of the electron source (see Fig. 3). This way, each ray is focussed on the same area of the sample as long as the sample surface is in focus. However, as a consequence, the beam traverses the field of the objective lens considerably off-axis with its attendant degradations due to lens aberrations. Especially chromatic aberrations limit the attainable resolution to several tens of nanometers. Many applications require a much higher resolution of about 5 nm.

If, as in another method, the deflection coils are arranged below the objective lens (post-lens deflection), the beam passes through the lens on the optical axis (Fig. 3). However, the physical dimensions of the coils below the final lens imposes a limit on the minimum attainable working distance, i.e., on the minimum attainable distance between the final lens and the specimen to be examined. An acceptable resolution is then not achieved due to the degraded instrument resolution arising from the enlarged working distance.

SUMMARY OF THE INVENTION

The present invention intends to overcome the above-mentioned drawbacks and disadvantages of the prior art. Specifically, the invention intends to provide an improved charged particle beam column allowing specimen to be examined with an oblique beam landing angle while maintaining a high resolution of the charged particle image. According to one aspect of the present invention, to achieve this, there is provided a column as specified in claim 1 and a method as specified in claim 13.

Further advantageous features, aspects and details of the invention are evident from the dependent claims, the description and the accompanying drawings. The claims are intended to be understood as a first non-limiting approach to define the invention in general terms.

According to one aspect, the invention provides a column for directing a beam of charged particles with a finite energy spread onto a specimen surface under an oblique beam landing angle, the column comprising: a particle source for providing the beam of charged particles propagating along an optical axis; an objective lens for focussing the beam of charged particles onto the specimen surface; a deflection unit for deflecting the beam of charged particles away from the optical axis such that the beam of charged particles traverses the objective lens off-axis, thereby causing a chromatic aberration, a compensation unit adapted to disperse the beam of charged particles, thereby substantially compensating said chromatic aberration in the plane of the specimen surface, whereby the combined action of the objective lens and the deflection unit directs the beam of charged particles to hit the specimen surface under said oblique beam landing angle.

As discussed hereinbefore, the deflection leads to an off-axis path of the beam through the objective lens which gives rise to large chromatic aberrations due to the finite energy spread of the beam. It has surprisingly been found by the present inventors that this first chromatic aberration caused by the deflection can be compensated in the plane of the specimen surface by adding an element which introduces a second chromatic aberration of substantially the same kind and magnitude as the first chromatic aberration but which is substantially in the

opposite direction. Such a second chromatic aberration may be introduced by dispersing the beam of charged particles.

In a preferred embodiment the compensating element comprises means for generating crossed electrostatic and magnetic deflection fields. Preferably, the crossed electrostatic and magnetic fields are created substantially perpendicular to the optical axis and form a so-called Wien filter. The compensation unit is advantageously in the form of an electrostatic and magnetic multipole (2n-pole, with $n=1, 2, 3 \dots$), preferably selected from the group consisting of electrostatic and magnetic dipole (2-pole), quadrupole (4-pole), hexapole (6-pole) and octupole (8-pole).

In a further preferred embodiment, the electrostatic and magnetic 2n-pole comprises 2n pole pieces and 2n electrodes which are distinct from said pole pieces. The pole pieces and the electrodes are arranged in a plane perpendicular to the optical axis. In a still further preferred embodiments, the electrostatic and magnetic 2n-pole comprises 2n pole pieces, wherein each of the 2n pole pieces is adapted to be used at the same time as an electrode. The pole pieces are arranged in a plane perpendicular to the optical axis.

Without being bound to a particular theory, the compensating effect of a Wien filter in the column is presently understood as follows:

For a certain beam landing angle, for example 5° , the necessary deflection causes the center of the beam to pass the objective lens at a certain distance from the optical axis. Then, the focal length of the objective lens depends on the energy of the charged particles and on the distance between the trajectory of the beam center and the optical axis. Since the beam of charged particles has a finite energy spread, particles with different energies are deflected by the lens in slightly different direction, causing the chromatic aberration of the lens (see Fig. 3).

In the Wien filter, the electric field E and the magnetic field B generate an electric and a magnetic force on the charged particles, $F_e = qE$, and $F_{mag} = q(v \times B)$, wherein $q = -e$ is the electron charge. If the electric and magnetic field are perpendicular to each other and to the velocity of the charged particle, the electric and magnetic forces are in opposite directions. For particles with a certain velocity, $v = |E|/|B|$, the net force is zero, and they pass the filter unaffected. Particles with a different speed experience a net force $F = |F_e - F_{mag}|$ and are

deflected by the Wien filter. In effect, a beam of charged particles with a finite energy spread passing the Wien filter is dispersed, as particles with different energies are deflected by different amounts.

The dispersion leads to an at least partial compensation of the chromatic aberration of the objective lens. The invention has thus the advantage that large beam landing angles on the sample surface can be provided without the usual reduction in resolutions arising from large chromatic aberrations.

In the case where the compensation unit is formed by an electrostatic and magnetic $2n$ -pole with n being at least 2, both magnetic and electrostatic fields can be adjusted to deflect in an arbitrary direction in the plane perpendicular to the optical axis. Thereby, a compensation can be achieved for any direction of the deflecting action.

In the case where the compensation unit is formed by an electrostatic and magnetic $2n$ -pole with n being at least 3, more homogeneous deflection fields may be generated. This is especially important, if the fields are to be strong, if the beam diameter in the Wien filter is large, or if the charged particle beam is allowed to pass the filter off-axis. Additionally, higher order deflection fields can be generated which reduce or compensate the coma of the objective lens, which forms the second largest tilt aberration.

If the pole pieces are used at the same time as electrodes, electric and magnetic field with substantially identical spatial distribution are generated. The excellent matching of the fields is important when the deflection fields are to be very strong.

In a preferred embodiment, the deflection unit is adapted to provide a beam landing angle less than 25° , preferably between 3° and 15° , more preferable between 5° and 10° .

In a further preferred embodiment, the deflection unit comprises two deflectors adapted to deflect the beam of charged particle away from the optical axis to a path seeming to emerge from a point coincident with the apparent position of the particle source or, if applicable, to emerge from a point coincident with the apparent position of an intermediate image of the particle source.

In a still further preferred embodiment, the compensation unit is arranged between the particle source and the deflection unit. In certain cases it may be advantageous, to arrange the compensation unit within the deflection unit. Even though these two arrangements are preferred, it is also possible to arrange the compensation unit below the deflection unit.

Although the deflection system described so far can be used with any kind of objective lens, in a further aspect of the invention, the objective lens is a compound magnetic-electrostatic lens. Preferably, the electrostatic part of the compound magnetic-electrostatic lens is an electrostatic retarding lens. Using such a compound magnetic-electrostatic lens yields superior resolution at low acceleration energies, such as a few hundred electron volts in case of a SEM. Such low acceleration energies are desirable especially in modern semiconductor industry, to avoid charging and/or damaging of radiation sensitive specimens. In a preferred embodiment, the electrostatic retarding lens reduces the energy of a beam of electrons as charged particles to less than 5 keV, more preferably to less than 2 keV, most preferably to about or less than 1 keV.

According to an especially preferred aspect of the invention, the objective lens is a magnetic immersion lens.

In a preferred embodiment, the column comprises means for applying a potential difference between the specimen and a pole piece of the objective lens. An electrostatic retarding lens may thus be created between the specimen and a pole piece of the objective lens, without making additional electrodes necessary. The skilled person will appreciate, however, that additional electrodes may be present to supplement and/or modify the thus generated retarding field.

Preferably, the column further comprises means for scanning the beam of charged particles over the surface of the specimen.

The invention further comprises a method for directing a beam of charged particles with a finite energy spread onto a specimen surface under an oblique beam landing angle, the method comprising the steps of:

- a) providing a beam of charged particles with a finite energy spread propagating along an optical axis;

b) focussing the beam of charged particles onto the specimen surface with an objective lens;

whereby the method is characterized in further comprising the steps of

c) selecting a beam landing angle;

d) deflecting the beam of charged particles propagating along the optical axis away from the optical axis such that the beam of charged particles traverses the objective lens off-axis, thereby causing a first chromatic aberration;

whereby the magnitude of the deflection is chosen such that the combined action of deflecting and focussing the beam directs the beam of charged particles to hit the specimen under said large beam landing angle;

e) dispersing the beam of charged particles, thereby introducing a second chromatic aberration of substantially the same kind and magnitude but in substantially opposite direction as said first chromatic aberration to substantially compensate said first chromatic aberration in the plane of the specimen surface.

Preferably step e) of the method comprises: generating within a region along the optical axis crossed electrostatic and magnetic fields substantially perpendicular to the optical axis and to each other; and passing the beam of charged particles through said region.

DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

In the following, preferred embodiments of the invention are discussed which use electrons as charged particles. The invention is, however, not limited to the use of electrons but encompasses the use of protons, ions and other charged particles as well.

For a better understanding of the invention, typical problems associated with prior art designs in SEMs are illustrated in Figs. 3 and 4. Elements such as the anode of the electron source, condenser lenses, apertures, scan coils, detectors and the like that are not important for understanding the present invention are omitted in the drawings. Generally, an electron beam

is released from an electron source 12 and propagates along the optical axis 16 towards an objective lens 20.

The electrons in the beam are not monochromatic, but are emitted with slightly different energies. For example, in a thermionic electron gun, the energy spread (i.e., the full width at half maximum of the electron energy distribution) is of the order of $\Delta E = 2.5 kT_c$, where T_c is the temperature of the cathode tip and k is Boltzmann's constant. This energy spread is further increased by the Boersch effect arising from space-charge oscillations near the crossover, so that thermionic tungsten cathodes show an energy spread of $\Delta E = 1 - 3$ eV, while for LaB_6 cathodes the value is $\Delta E = 0.5 - 2$ eV. Field emission guns usually have a lower energy spread due to the smaller cathode temperatures of the order of $\Delta E = 0.2 - 0.4$ eV (L. Reimer, Scanning Electron Microscopy, Springer, 1985).

The objective lens 20 focuses the electron beam onto the surface of a specimen 18. The interaction of the electron beam with the specimen 18 generates secondary electrons which are collected and detected by a suitable detector (not shown).

In Fig. 3, a two-stage pre-lens deflection unit 70 deflects the beam from its path 15a along the optical axis 16 to a path 15b which seems to emerge from a point coincident with the apparent position of the particle source 12. That way the deflected beam is focussed by the objective lens 20 on the same area of the sample for any deflection as long as the sample surface is in focus (ray 15d). Due to the deflection, the beam traverses the field of the objective lens considerably off-axis (reference sign 22) leading to large chromatic aberrations arising from the finite energy spread of the beam.

For an on-axis beam, the finite energy spread of the beam results in a disk of least confusion with diameter d_c , which can be written as

$$d_c = C_c \alpha \Delta E/E, \quad (1)$$

where C_c is the chromatic aberration coefficient, α is usually the convergence angle, and $\Delta E/E$ is the fractional variation in the electron-beam energy. Formula (1), which describes the chromatic aberration for an on-axis beam with convergence angle α , can also be used to describe a situation where the charged particle beam passes the lens off-axis. In this case, the convergence angle α has to be replaced by the beam landing angle in equation (1) and the

length d_c is a lateral extension of the elongated beam cross section. A large chromatic aberration arises as the beam landing angle is very large (several degrees) compared to typical convergence angles (a few tenth of a degree).

The effect is schematically shown in Fig. 3 by rays 15e, 15d and 15c representing electrons with energies $E - \Delta E$, E , and $E + \Delta E$, respectively. As illustrated, electrons with higher energies are deflected less than electrons with lower energies. In designs as illustrated in Fig. 3, chromatic aberration blurs the image and limits the attainable resolution to several tens of nanometers.

Figure 4 shows an alternative prior art design wherein deflection coils 82, 84 are arranged below the objective lens 20 to form a post-lens deflection system 80. After the beam passes through the objective lens 20, a first deflection coil 82 deflects the beam away from the optical axis and a second deflection coil 84 directs the beam back to the optical axis to hit the sample under the desired beam landing angle. As the beam passes the objective lens 20 on the optical axis 16, the resolution is not degraded by the off-axis aberration of the lens. However, the physical dimensions of the coils below the final lens 20 imposes a limit on the minimum working distance attainable, requiring objective lenses with larger focal lengths. The larger focal length then gives rise to increased chromatic as well as to increased spherical aberrations. Accordingly, solutions as illustrated in Fig. 4, do also not achieve acceptable image resolutions.

Figure 1 illustrates a particular embodiment of a column according to the invention, generally represented by the reference numeral 10. As before, an electron beam is released from an electron source 12 and propagates on a path 14a along the optical axis 16 towards an objective lens 20 which focuses the beam onto the surface of a specimen 18. The deflection unit 30 comprises two deflectors 32, 34 to deflect the beam away from the optical axis to a path 14b which seemingly emerges from a point coincident with the apparent position of the electron source 12. Depending on the design of the column, reference sign 12 may represent the electron source itself or an intermediate image of the electron source.

In the embodiment of Fig. 1, the deflection unit 30 is arranged between the electron source 12 (or an intermediate image thereof) and the objective lens 20, i.e. deflection unit 30 is shown as a pre-lens deflection unit. However, the deflection unit 30 may also be placed in

the vicinity of or even deep inside of the objective lens 20 such that their respective fields overlap.

Above the deflection unit 30, a Wien filter 40 is disposed which generates crossed electric and magnetic fields. In the embodiment of Fig. 1, where the electrons move generally in +z-direction, and the deflection unit 30 deflects the electrons in +x-direction, the electric field E is chosen along the x-axis and the magnetic field B is along the y-axis. As mentioned above, the electric and magnetic forces on the electron are then in opposite directions. Electrons with velocity $v = |E|/|B|$ pass the filter unaffected, while electrons with a different speed experience a net force and are deflected by the Wien filter 40.

For small deflection angles, the momentum approximation can be used and the pivot point of the deflection then lies at the center of the deflection unit. Assuming that the electrons fly through a region with transverse fields with length L , the momentum transfer p_x to the electrons during the time of flight through the deflection fields can be written:

$$p_x = -e L (E_x/v + B_y)$$

where $-e$ is the electron charge, E_x is the electric field along the +x-axis, B_y is the magnetic along the +y-axis, and v is the electron speed along the +z-axis (L. Reimer, loc. cit.). It is easily seen from the above equation, that for electrons with velocity $v_0 = E_x/B_y$, the momentum transfer is zero, i.e. these electrons pass the filter unaffected. For the solution for v_0 to be meaningful (i.e. positive), E_x and B_y must have opposite sign, for example, the electric field may be applied along the positive x-direction and the magnetic field along the negative y-direction.

For electrons with slightly larger or smaller speeds than v_0 the momentum transfer leads to a deflection angle $\epsilon = p_x/p_z$. This deflection angle is positive (deflection in +x-direction, path 14d) if the electrons have a speed smaller than v_0 , and it is negative (in -x-direction, path 14c), if the electrons are faster than v_0 .

The off-axis path of the electron beam through the objective lens 20 causes a first chromatic aberration. The energy dispersive effect of the Wien filter 40 introduces a second chromatic aberration of the same kind as the first chromatic aberration. Appropriately choosing the strength of the electric field E and magnetic field B , the second chromatic

aberration can be adjusted to have the same magnitude but opposite direction as the first chromatic aberration. In effect, the second chromatic aberration substantially compensates the first chromatic aberration in the plane of the specimen surface.

Equation (1) shows that the chromatic aberration of the objective lens 20 depends on the beam landing angle. For a different beam landing angles, the electron beam traverses the objective lens 20 generally at different distances from the optical axis 16. Thus, if in operation a change in the beam landing angle is desired, the electric and magnetic fields of the Wien filter 40 have to be set accordingly.

Figure 2 shows another embodiment of the invention, wherein the Wien filter 40 is not arranged above the deflection unit 30, but within the deflection unit such that the fields of the deflection unit 30 and of the Wien filter 40 overlap. Figure 2 shows the Wien filter 40 to be positioned at the height of the second deflection coils 34, but this is merely for ease of illustration. As in the first embodiment, the Wien filter introduces a dispersion in the beam of electrons 114a, such that faster electrons (energy $E + \Delta E$) traverse the objective lens 20 closer to the optical axis 16 (path 114c), while slower electrons (energy $E - \Delta E$) traverse the lens further away from the optical axis (path 114d). As the deflection of the objective lens 20 is stronger for the slower electrons, all particles are focused on the same spot on the specimen 18.

While the figures show the deflection unit 30 to comprise two deflection coils 32, 34, it is also within the scope of the invention to use a deflection unit 30 consisting of a single deflector only. For example, if reference sign 12 represents an intermediate image of the electron source, a single deflector placed at the height of the intermediate image is sufficient to deflect the beam from the optical axis 16 to a path which seems to emerge from the intermediate image of the electron source.

Figures 5a,b show an embodiment of a Wien filter wherein the Wien filter forms an electrostatic and magnetic quadrupole (4-pole) 140. The quadrupole comprises four pole pieces 142 and four electrodes 144. The electrodes and pole pieces are arranged in a plane perpendicular to the optical axis 16. As best shown in Fig. 5a, the electrodes and the pole pieces are each placed along the circumference of a circle, spaced by an angle of $\pi/2$. Since the pole pieces and the corresponding electrodes have the same length (Fig. 5b) and almost the same radius (Fig. 5a), the resulting electric and magnetic field distributions are very

similar, leading to a good compensations of the electric and magnetic forces for the electrons with velocity v_0 in any point along the optical axis of the Wien filter.

While it is not necessary that the electric and magnetic fields closely match each other, it is advantageous, because otherwise the electron beam is strongly deflected away from the optical axis before the deflection is compensated by the other kind of field, thereby introducing additional off-axis aberrations.

Using such a quadrupole arrangement, magnetic and electrostatic fields can be adjusted to deflect in an arbitrary direction in the plane perpendicular to the optical axis. Thereby, a compensation can be achieved for any direction of the deflecting action. Strong deflection fields of the Wien filter may lead to astigmatism. This astigmatism can be compensated by exciting the quadrupole (stigmator) electrostatic or magnetic field on the Wien filter.

It is also possible to create the magnetic fields without the use of pole pieces, i.e. with air coils alone. However, the match between the electrostatic and magnetic fields is then usually not as good as in the previously described case.

In another embodiment of the Wien filter (Figs. 6a,b), the four pole piece 242 of an electrostatic and magnetic quadrupole 240 are electrically insulated from the magnetic circuit 246. They can therefore be used at the same time as electrodes. This has the advantage that the shape of the pole pieces and electrodes is automatically identical, leading to electric and magnetic field with substantially identical spatial distributions. The excellent matching of the respective fields is important if the deflection fields are to be very strong as then even a small misalignment of the fields may cause a large beam deflection.

Figures 7 and 8 illustrate embodiments of a Wien filter wherein the Wien filter forms an electrostatic and magnetic octupole (8-pole) 340. The embodiment shown in Fig. 7 comprises eight pole pieces 342 and eight electrodes 344, arranged in a plane perpendicular to the optical axis 16 along the circumference a circle, spaced by an angle of $\pi/4$. Again, the pole pieces and the corresponding electrodes have the same length and almost the same radius (Fig. 7), to achieve electric and magnetic fields with similar spatial distributions. In the embodiment of Fig. 8, the pole pieces 442 of the electrostatic and magnetic octupole 440 are isolated from the magnetic circuit 446 to be used simultaneously as electrodes generating the electric field.

An electrostatic and magnetic octupole allows to generate more homogeneous deflection fields. This feature is especially important, if the deflection fields are to be strong, or if the diameter of the Wien filter is large, or if it is desired that the beam of charged particle can pass the Wien filter not exactly on the optical axis. Additionally, higher order deflection fields can be generated which reduce or compensate the coma of the objective lens, which forms the second largest aberration arising from the large beam landing angle. Very large beam landing angles ($> 15^\circ$) have thus been achieved with an excellent resolution of less than 5 nm.

Further embodiments illustrating the invention are shown in Figs. 9 to 12. Figure 9 shows a Wien filter 40, for example an electrostatic and magnetic multipole according to any of Figs. 5 to 8, arranged above deflection unit 30. The objective lens may, for example, be a single stage purely magnetic lens 120 (Fig. 9) or an immersion lens 220, where the pole pieces 252, 254 are arranged such that the specimen 18 is in or close to the region of maximum magnetic field (Fig. 10). Figure 11 illustrates a case where the objective lens is an immersion lens 320, whose outer pole piece 352 is formed by the vacuum chamber wall.

Three further embodiments for improved resolution at very low energies of about or below 1 keV are illustrated with respect to objective lens 420 in Fig. 12. In a first case, electrodes 424, 426, and the potentials U2 and U3 are absent. An electrostatic retarding field arises is created by applying a potential difference U1 between the specimen 18 and a pole piece 452, 454 of the objective lens 420.

In a second case, electrodes 424, 426 and the corresponding potentials U2 and U3 are also present to supplement the retarding field created between the specimen and a pole piece of the objective lens 420. In a third case, the means for generating potential U1 are absent. A retarding field is then created by the electrodes 424 and 426 alone. The skilled person will appreciate that one of the electrodes 424, 426 may be formed by a pole piece 452, 454 of the lens 420.

Although the magnetic part of the objective lens 420 is preferred to be an immersion lens, this needs not necessarily be the case. Any magnetic lens, especially those shown in Figs. 9 to 11 may be combined with an electrostatic retarding lenses such as those illustrated in Fig. 12 above.

4 Brief Description of Drawings

Some of the above indicated and other more detailed aspects of the invention will be described in the following description and partially illustrated with reference to the figures in which

- Fig. 1 is a schematic vertical cross section of a beam column according to an embodiment of the invention;
- Fig. 2 is a schematic vertical cross section of a beam column according to another embodiment of the invention;
- Fig. 3 is a schematic vertical cross section of a prior art beam column using a pre-lens deflection system;
- Fig. 4 is a schematic vertical cross section of a prior art beam column using a post-lens deflection system;
- Fig. 5a is a schematic horizontal cross section of a Wien filter according to an embodiment of the invention;
- Fig. 5b is a schematic vertical cross section of the Wien filter of Fig. 5a;
- Fig. 6a is a schematic horizontal cross section of a Wien filter according to another embodiment of the invention;
- Fig. 6b is a schematic vertical cross section of the Wien filter of Fig. 6a;
- Figs. 7-8 are horizontal cross sections of Wien filters according to further embodiment of the invention;
- Figs. 9-12 show vertical cross sections of the lower part of beam columns according to further advantageous embodiment of the invention;

In the figures, like reference numerals refer to like elements.

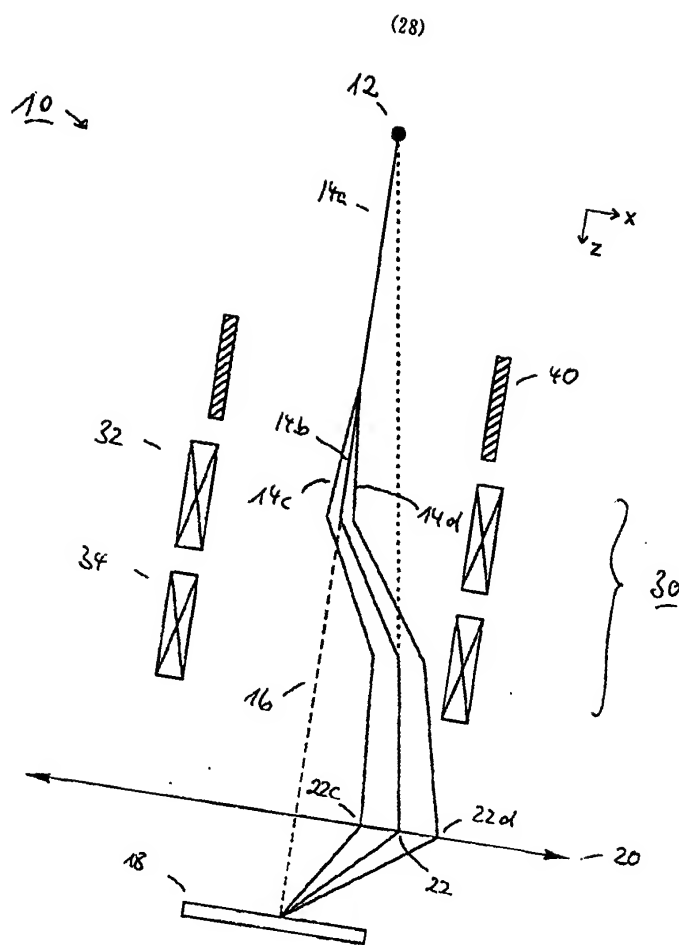


Fig. 1

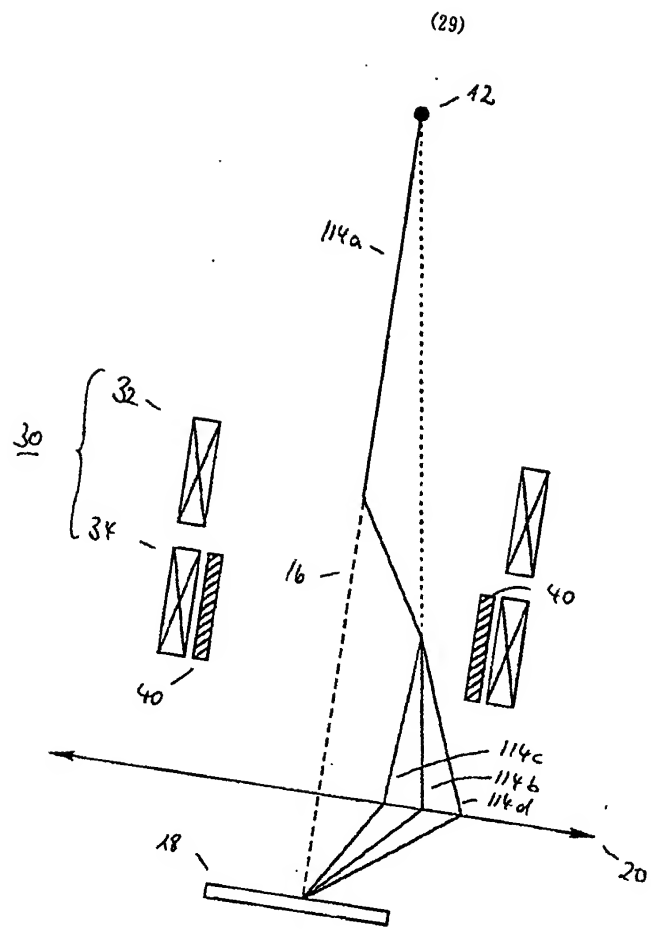


Fig. 2



Fig. 3

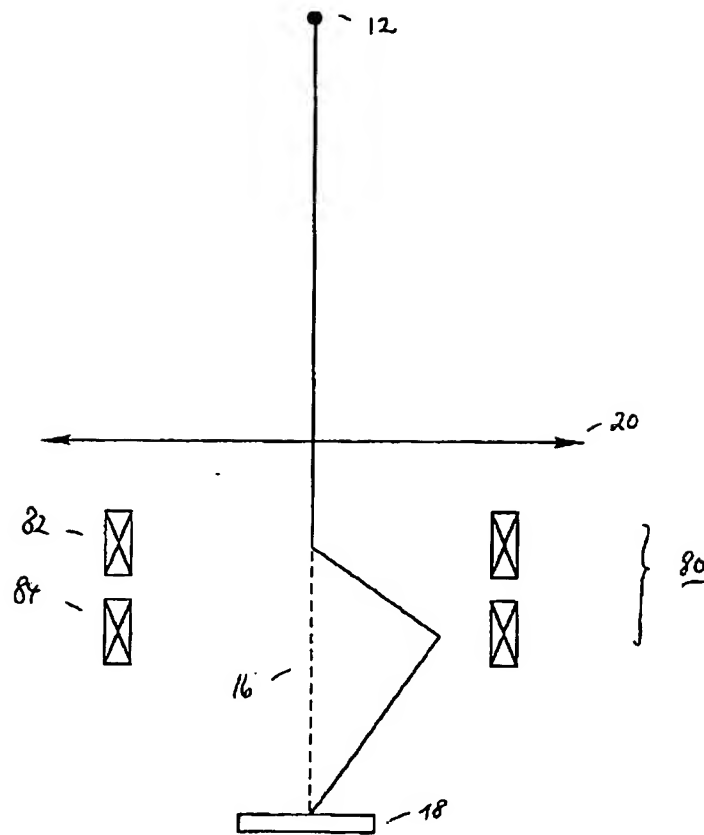
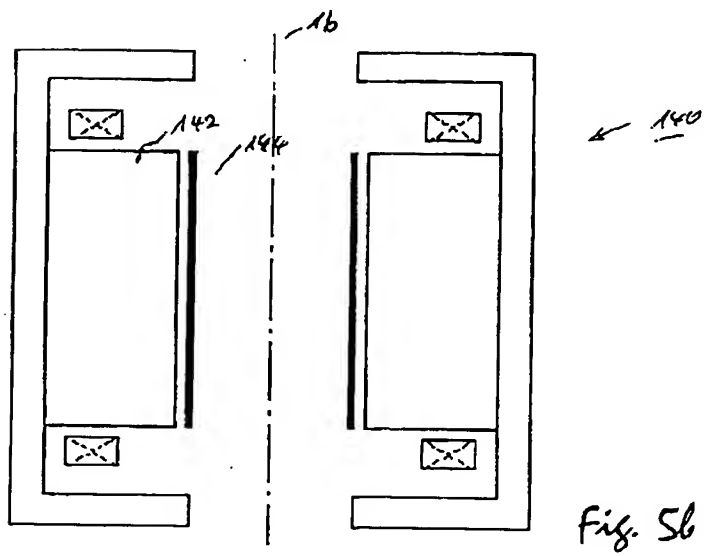
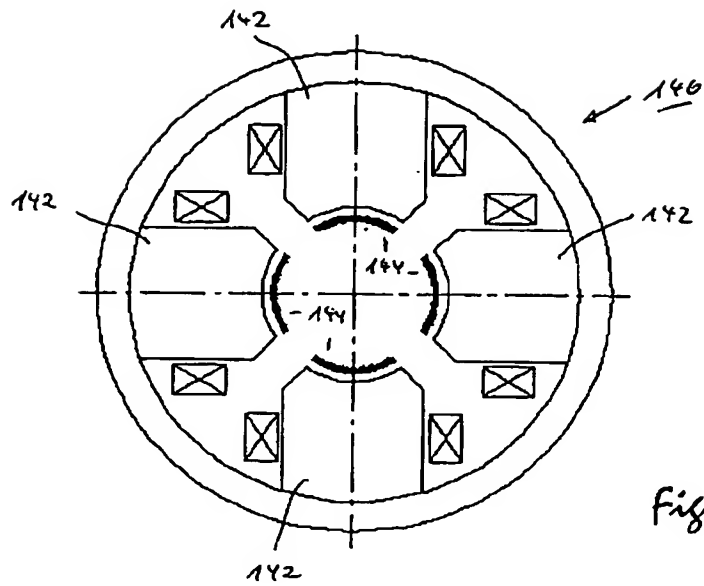


Fig. 4



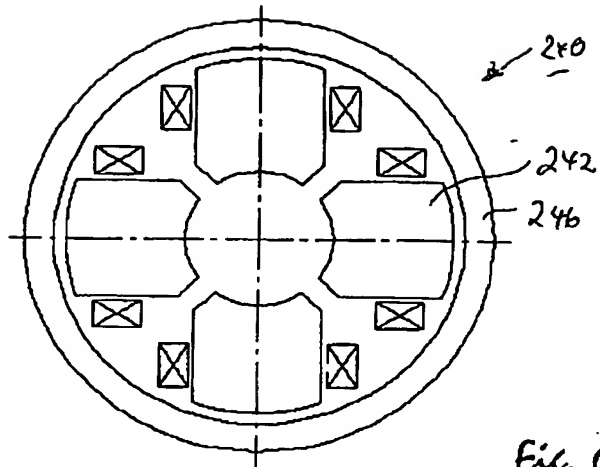


Fig. 6a

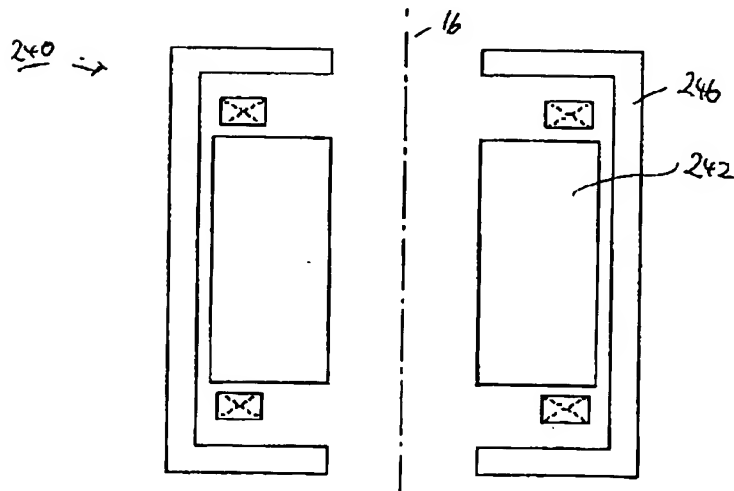


Fig. 6b

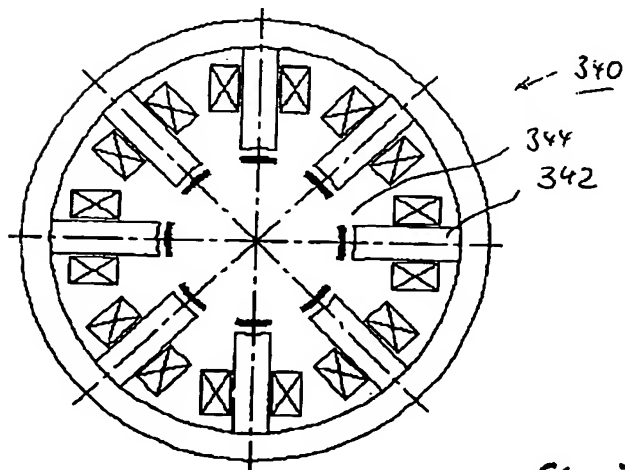


Fig. 7

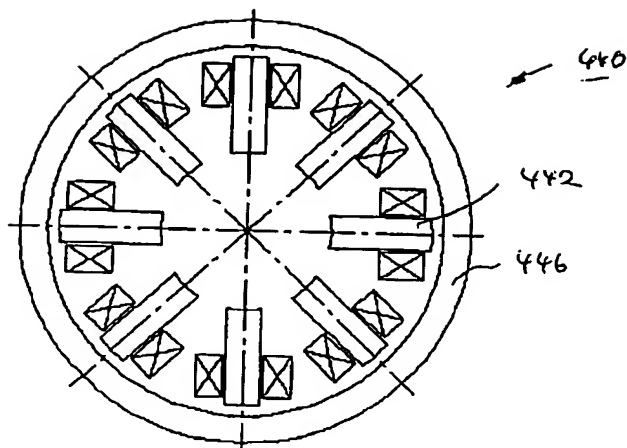


Fig. 8

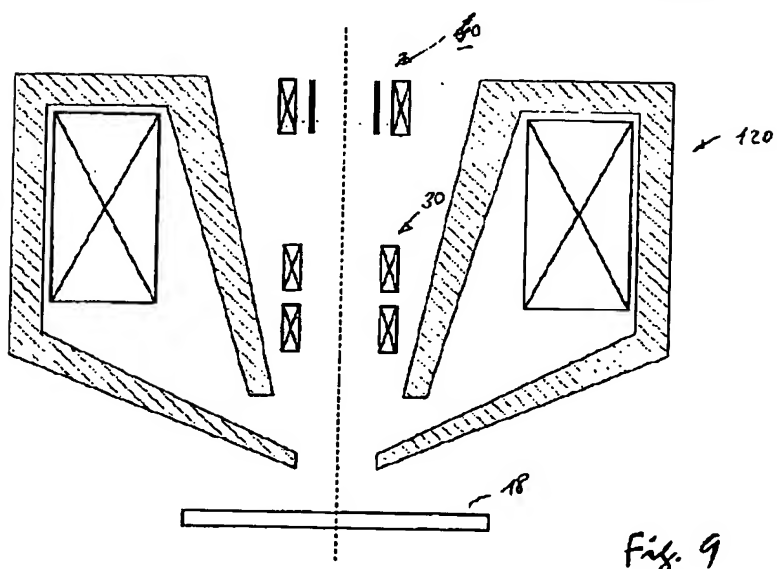


Fig. 9

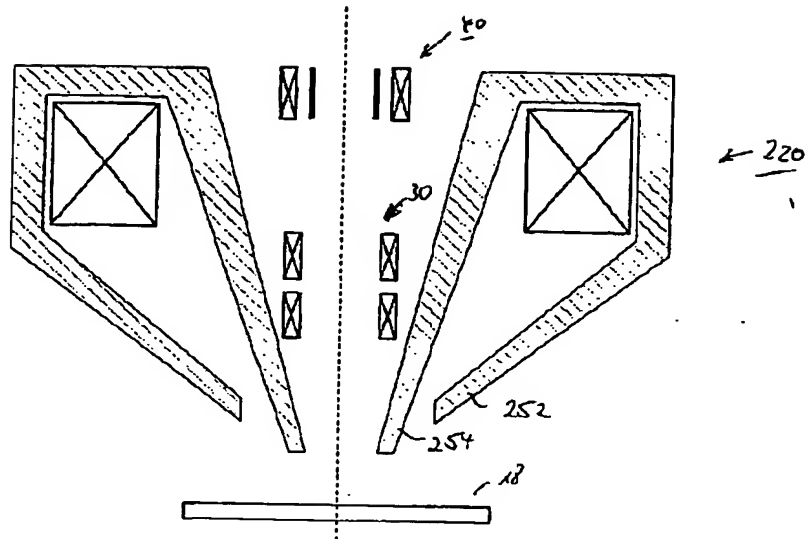


Fig. 10

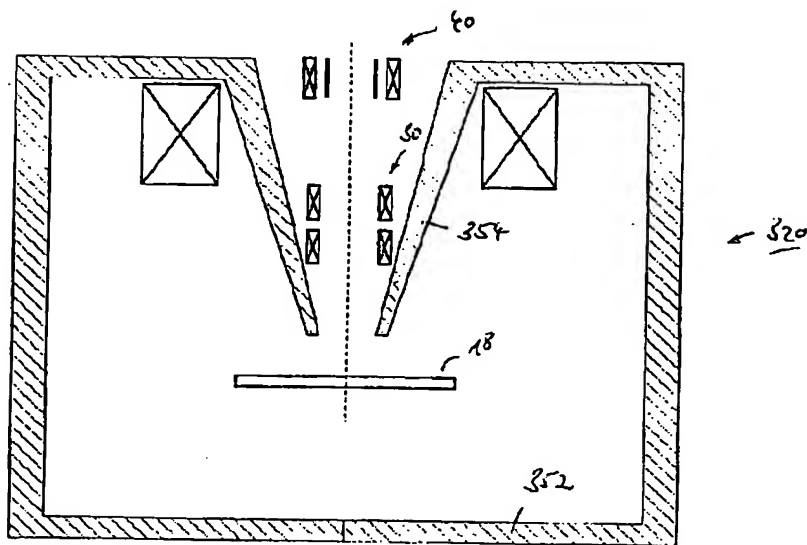


Fig. 11

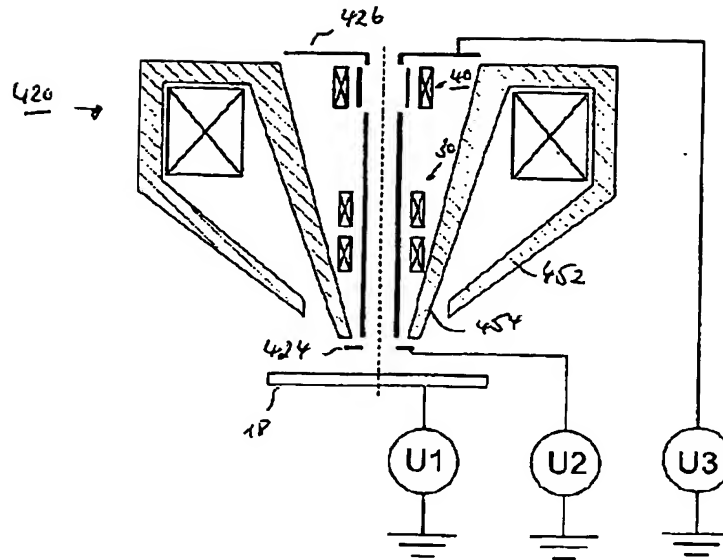


Fig. 12

1 Abstract

A column for directing a beam of charged particles with a finite energy spread onto a specimen surface under an oblique beam landing angle comprises: a particle source; an objective lens; a deflection unit for deflecting the beam of charged particles away from the optical axis such that the beam of charged particles traverses the objective lens off-axis, thereby causing a chromatic aberration, a compensation unit adapted to disperse the beam of charged particles, thereby substantially compensating said chromatic aberration in the plane of the specimen surface, whereby the combined action of the objective lens and the deflection unit directs the beam of charged particles to hit the specimen surface under said large beam landing angle.

2 Representative Drawing Fig. 1